



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

ESTUDO COMPARATIVO: MODELAGEM NUMÉRICA E FÍSICA DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO NAS VIZINHANÇAS DE UM OBSTÁCULO ISOLADO DE GEOMETRIA COMPLEXA

Jamily F. Stocco^{*1}, Pamella G. Paganoto¹, Stephanie C. Zucoloto¹, Carolina L. Guimarães¹ e Reginaldo R.C. Paula¹

^{*1} Laboratório de Energia – Instituto Federal do Espírito Santo –
Av. Vitória, 1729 Vitória, Espírito Santo, Brasil
correo-e: jamilyfae@gmail.com

RESUMO

Separação do escoamento, regiões de recirculação e diferentes sistemas de estruturas vorticosas causados pela presença de um obstáculo na camada limite atmosférica é de crucial importância em vários campos das engenharias mecânica, ambiental e civil. Pois estes mecanismos podem estar associados a transferência de massa, quantidade de movimento e energia, bem como queda de pressão e dispersão de poluentes [1]. No presente estudo experimentos de túnel de vento de camada limite atmosférica foram realizados a fim de validar resultados numéricos de diferentes modelos de turbulência estudado com o uso do programa comercial CFX 14.5. O objetivo principal deste trabalho foi investigar numericamente os efeitos que um obstáculo isolado de geometria complexa pode causar na estrutura do campo de vento. Foram testados dois obstáculos com telhado do tipo uma água e duas águas. As influências da direção e velocidade do vento também foram investigadas considerando-se diferentes números de Reynolds. Nas simulações numéricas foi utilizado o modelo de turbulência κ - ϵ padrão. Nos experimentos de túnel de vento foi utilizada a técnica injeção de fumaça e uma plano de laser para se obter uma visualização da estruturas turbulentas nas proximidades do obstáculo isolado.

Palavras chaves: *Camada limite atmosférica, modelagem da turbulência, obstáculo isolado*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

A compreensão e a análise das características aerodinâmicas do escoamento ao redor de um obstáculo isolado são cruciais em muitas áreas das engenharias mecânica, civil e ambiental. Pois estudos deste mecanismo podem ser aplicados em problemas práticos relacionados à dispersão de poluentes, carga do vento nas superfícies do corpo, conforto térmico, economia de energia e sistema natural de ventilação de edifícios [2-5].

O padrão do campo de vento incidente sobre um obstáculo depende das condições da estabilidade atmosférica, rugosidade superficial, geometria e dimensões do obstáculo [6]. A presença do obstáculo significativamente altera o padrão do escoamento turbulento local, na qual se tem uma subdivisão em diferentes zonas que são aproximadamente interconectadas. Estas são caracterizadas pela presença de camada limite cisalhante, separação do escoamento e possível recolamento no telhado e na esteira próxima, e diferentes estruturas vorticosas, tais como os vórtices ferraduras [7].

Existe na literatura uma considerável quantidade de trabalhos que investigaram o escoamento nas proximidades de obstáculos isolados, entretanto a maioria destes estudos utilizou prédios com telhados planos [8]. Poucos estudos investigaram a influência da geometria do telhado. No entanto experimentos de túnel de vento realizados por [9,10] mostraram que o perfil do telhado exerce uma significativa influência na estrutura do escoamento.

[11] utilizaram a dinâmica dos fluidos computacional (DFC) nas simulações numéricas do campo de vento em uma área de subúrbio formada por prédios com telhados duas águas, pirâmide e planos sob três direções do vento incidente (0, 45 e 90°). O objetivo foi verificar o potencial de instalação de turbinas eólicas no telhado de edificações em áreas urbanas. Os autores reportaram que telhados planos apresentaram um maior potencial de geração de energia em relação às outras formas analisadas. [12] realizaram experimentos de visualização do escoamento nas proximidades de um prédio industrial isolado em escala reduzida. Os resultados mostraram as estruturas vorticosas formadas no prédio de telhado do tipo *shed* foram diferentes em relação aos obstáculos com telhados do tipo arco e duas águas.

Simulações físicas em túnel de vento e modelagem numérica são importantes ferramentas utilizadas nos estudos do campo de escoamento nas proximidades de obstáculos. Na literatura encontram-se vários modelos de turbulência que podem ser empregados para um melhor entendimento deste mecanismo. Segundo [13] o modelo de turbulência κ - ϵ padrão e suas vertentes é o modelo mais empregado nestes estudos, apesar de suas deficiências nas simulações de escoamentos parietais e com separação.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Neste contexto, o objetivo principal do presente trabalho foi analisar a influência da geometria do telhado no campo de escoamento. Foram executados experimentos de túnel de vento e simulações numéricas com o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\varepsilon$ padrão para investigar o campo instantâneo e médio do escoamento ao redor de um obstáculo isolado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Experimentos de túnel de vento

A investigação do escoamento nas vizinhanças de um obstáculo isolado de geometria complexa do presente trabalho foi realizada em um túnel de vento de camada limite atmosférica com seção de testes de 2,0 m \times 0,5m \times 0,5 m, localizado no Laboratório de Energia do Instituto Federal do Espírito Santo, Ifes, Vitória, no Brasil. Foram utilizados dois obstáculos feitos de acrílico com telhados do tipo uma água e duas águas, com o vento incidente na face frontal com $\theta = 0^\circ$, 90° e 180° . O regime de escoamento turbulento foi caracterizado para os seguintes números de Reynolds, $Re = 905$ e $Re = 1920$, cuja velocidade de escala característica foi a do escoamento não perturbado medida na altura do prédio e a escala de comprimento característica foi a altura do prédio. As técnicas de injeção direta de fumaça e plano de luz de laser verde (500 mW e $\lambda = 532$ nm) foram utilizadas para a visualização do campo instantâneo do escoamento. Maiores detalhes do procedimento experimental de como foram realizados os registros das imagens podem ser encontrados em [12].

2.2 Método numérico

No presente trabalho foi utilizado o pacote comercial da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) ANSYS CFX 14.5 para resolver o campo de vento ao redor de um obstáculo isolado imerso numa camada limite atmosférica. Foram resolvidas numericamente as equações de conservação de massa e quantidade de movimento para um escoamento incompressível em regime permanente de um fluido com viscosidade constante com o uso do modelo de turbulência $\kappa\text{-}\varepsilon$ padrão. As simulações numéricas foram realizadas para $Re = 1920$ e $Re = 3931$. Na entrada do domínio computacional 3-D foi utilizado um perfil de lei de potência obtido dos experimentos de túnel de vento. A Tabela 1 mostra as condições de contorno inseridas no domínio computacional.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabela 1 – Condições de contorno de entrada.

Contorno	Condição de Contorno
Entrada	$u(z) = u_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^\alpha$ $k_{ent} = \frac{3}{2} I^2 U^2$ $\varepsilon_{ent} = \rho C_\mu \left(\frac{k^2}{\mu_t} \right)$
Saída	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
Lateral direita	Simetria
Lateral esquerda e topo	Parede livre de deslizamento
Superfícies dos prédios e base do plano xy ($z = 0$)	Parede com condição de não deslizamento

onde, $u(z)$ representa a velocidade média medida na altura z , u_o é a velocidade média da corrente livre medida na altura z_o , $\alpha = 0,3$ é coeficiente de rugosidade superficial, I é a intensidade da turbulência, $C_\mu = 0,09$ é uma constante, μ_t é a viscosidade turbulenta e p é a pressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 – Simulações Físicas em Túnel de Vento

As Figuras 1-4 mostram as visualizações experimentais do escoamento na região a montante da face frontal para diferentes configurações de obstáculos utilizados e $Re = 920$ e $Re = 1920$. Em todas as simulações abaixo do ponto de estagnação ocorreu uma interação do escoamento incidente com o escoamento reverso, resultando na formação de uma estrutura vorticosa frontal, denominada de vórtice *standing*, veja Figuras 1-4.

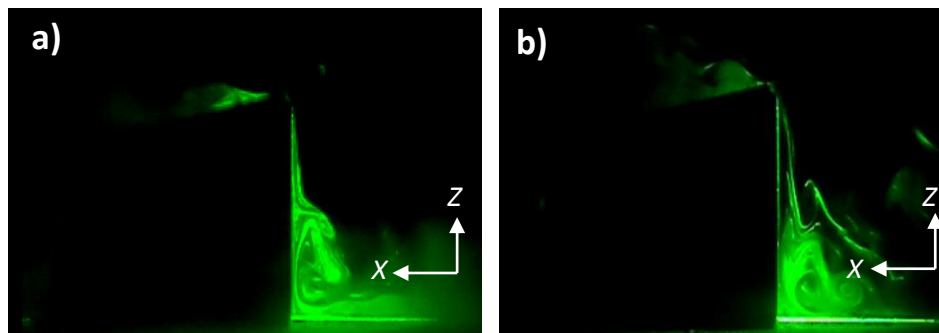


Figura 1 Visualização experimental do escoamento na região incidente do obstáculo uma água ($\theta = 0^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

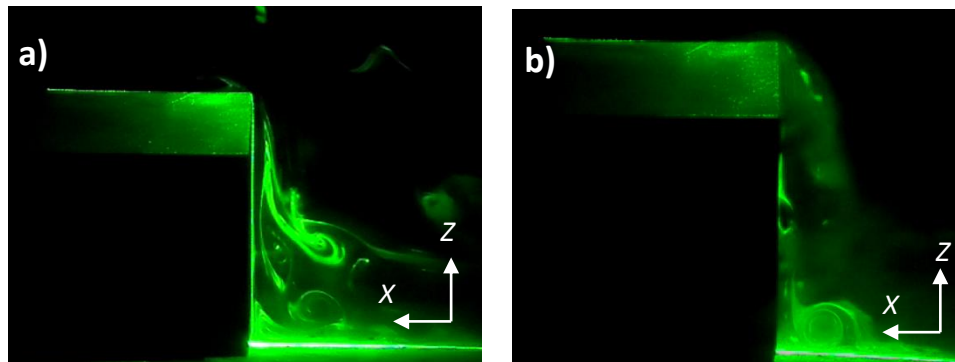


Figura 2 Visualização experimental do escoamento na região incidente do obstáculo uma água ($\theta = 180^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

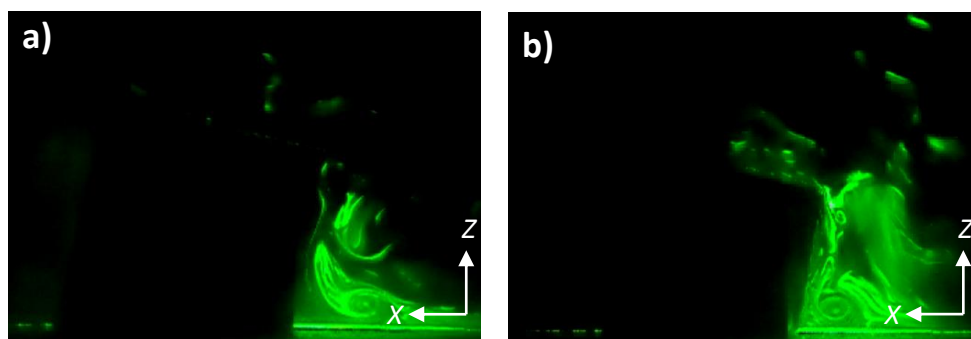


Figura 3 Visualização experimental do escoamento na região incidente do obstáculo duas águas ($\theta = 0^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

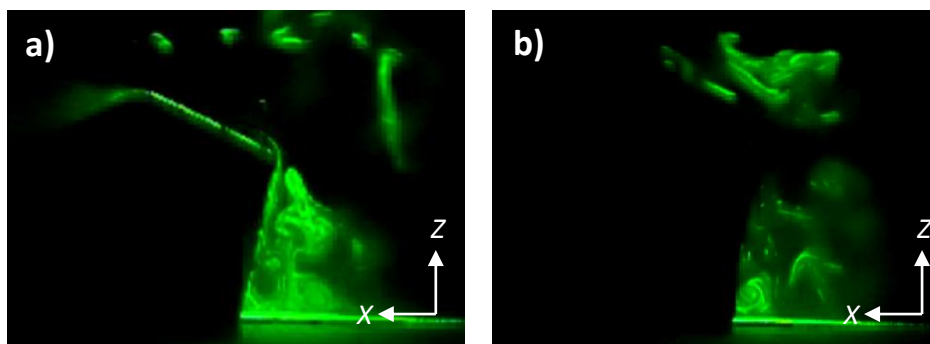


Figura 4 Visualização experimental do escoamento na região incidente do obstáculo duas águas ($\theta = 90^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.



As Figuras 5-8 mostram as visualizações do escoamento nas superfícies dos telhados para os diferentes obstáculos utilizados para $Re = 920$ e $Re = 1920$. Nas Figuras 5 e 7, para os obstáculos com telhados uma água e duas águas, vento incidente com $\theta = 0^\circ$, os resultados mostram que ocorreu uma separação do escoamento na extremidade do telhado voltada para a montante. Consequentemente, devido à presença de uma camada limite cisalhante, ocorreu a formação de uma zona de cavidade no telhado, caracterizada por um escoamento reverso, velocidade média baixa e alta intensidade da turbulência. Nas Figuras 6 e 8, para os obstáculos com telhados uma água (vento incidente com $\theta = 180^\circ$) e duas águas (vento incidente com $\theta = 90^\circ$) os resultados mostram o desprendimento de vórtices da superfície do telhado, denominados de vórtices *shedding*. A medida que estes vórtices foram convectados a jusante eles sofreram uma difusão.

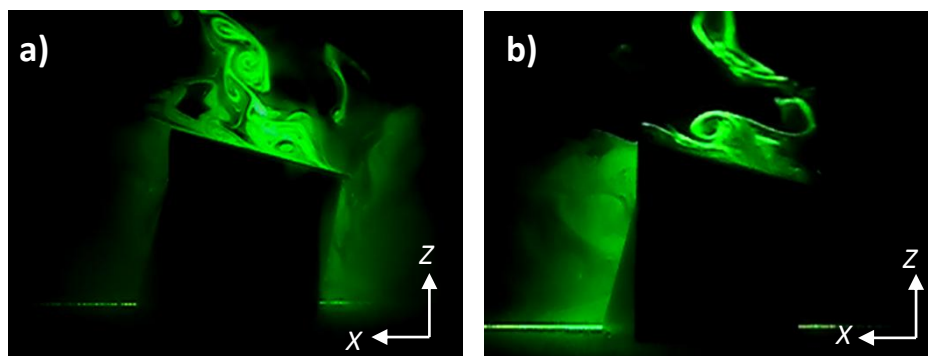


Figura 5 Visualização experimental do escoamento no telhado do obstáculo uma água ($\theta = 0^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

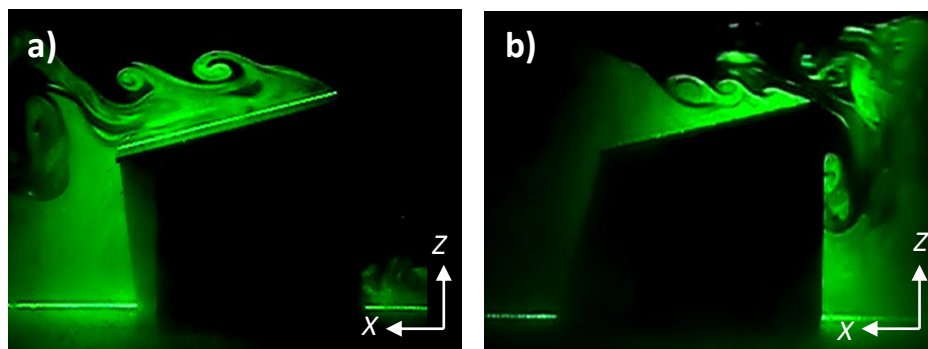


Figura 6 Visualização experimental do escoamento no telhado do obstáculo uma água ($\theta = 180^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

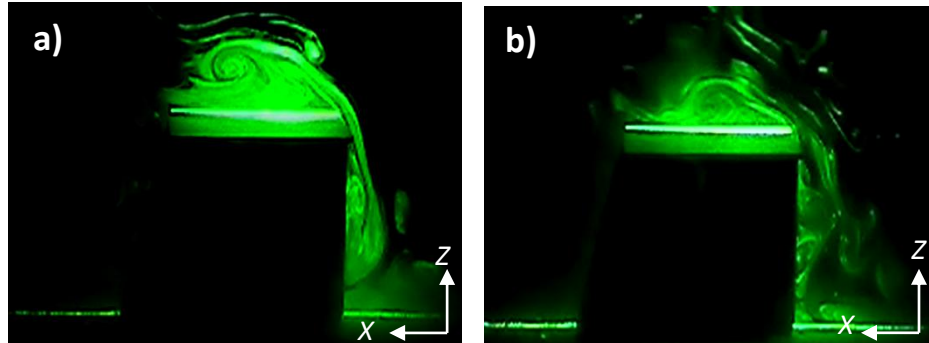


Figura 7 Visualización experimental del escoamento no telhado do obstáculo duas águas ($\theta = 0^\circ$):
(a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

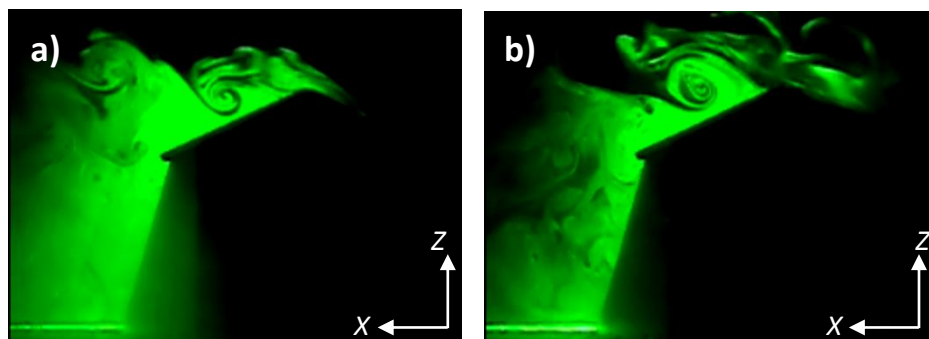


Figura 8 Visualização experimental del escoamento no telhado do obstáculo duas águas ($\theta = 90^\circ$):
(a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

As Figuras 9-12 mostram as visualizações do escoamento nas regiões de esteira das superfícies dos telhados para os diferentes obstáculos utilizados e $Re = 920$ e $Re = 1920$. Os resultados de todas as simulações físicas mostraram o comportamento característico de regiões de esteira próximas, onde ocorreu a formação de uma grande zona de cavidade e com um escoamento perturbado, na qual se tem uma recirculação do escoamento do solo em direção ao telhado do obstáculo. Esta recirculação pode ser vista claramente nas Figuras 9 (a) e 11(a).

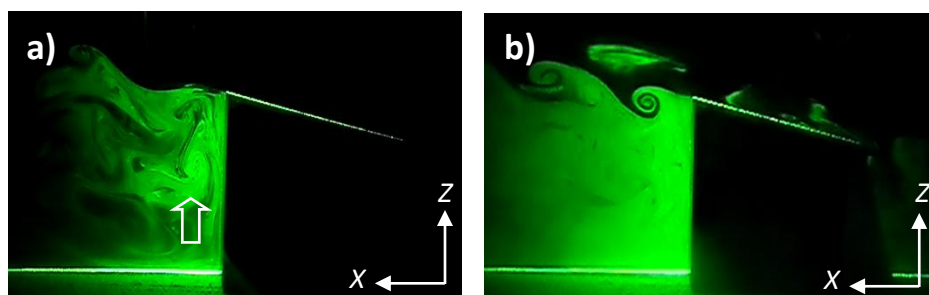


Figura 9 Visualização experimental del escoamento na região de esteira próxima do obstáculo uma água ($\theta = 0^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

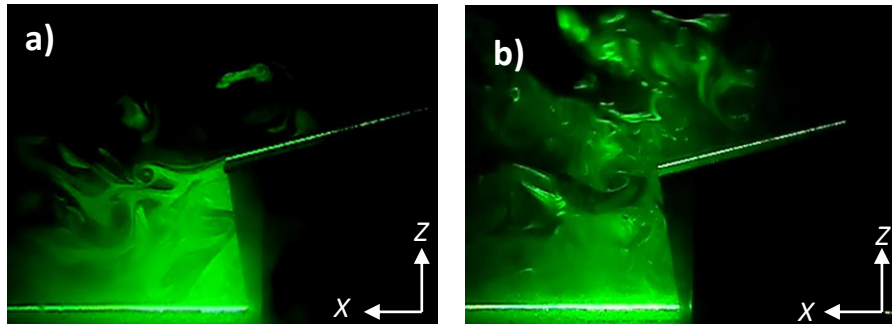


Figura 10 Visualização experimental do escoamento na região de esteira próxima do obstáculo uma água ($\theta = 180^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

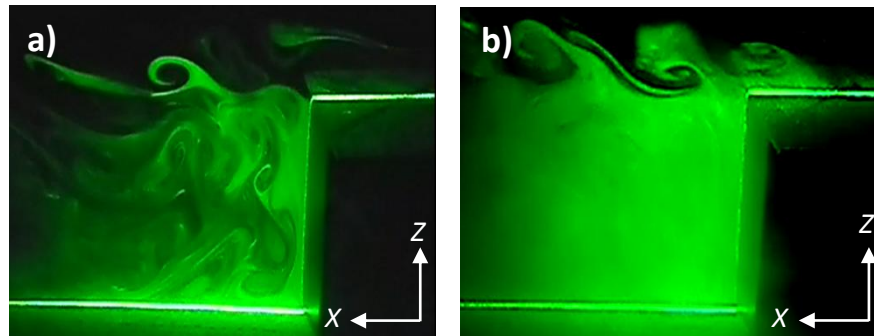


Figura 11 Visualização experimental do escoamento na região de esteira próxima do obstáculo duas águas ($\theta = 0^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

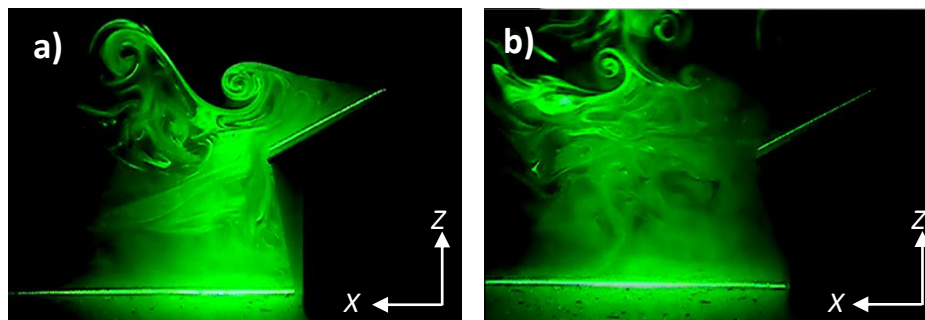


Figura 12 Visualização experimental do escoamento na região de esteira próxima do obstáculo duas águas ($\theta = 90^\circ$): (a) $Re = 905$ e (b) $Re = 1920$.

As Figuras 13-16 mostram os resultados das simulações numéricas com o modelo de turbulência $\kappa-\epsilon$ padrão para as diferentes geometrias de obstáculos utilizadas e números de Reynolds, $Re = 1920$ e 3931 . Nas Figuras 13-16, a montante da face frontal dos obstáculos o modelo conseguiu capturar a formação dos vórtices *standing* característicos de escoamentos com presença de parede. Na região de esteira próxima foi observada uma recirculação do solo em direção ao



telhado do obstáculo somente para os telhados uma água ($\theta = 180^\circ$) e duas águas ($\theta = 90^\circ$), veja Figuras 14 e 16. O modelo falha nas previsões da separação do escoamento e recirculação no telhado dos obstáculos uma água ($\theta = 0^\circ$) e duas águas ($\theta = 0^\circ$), veja as Figuras 13 e 15. Este resultado já era esperado, pois de acordo com [12,13] o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão apresenta deficiências nas simulações de escoamentos parietais, escoamentos com separação e com tensões normais significativas (escoamentos com forte curvatura de linhas de corrente e zonas de recirculação).

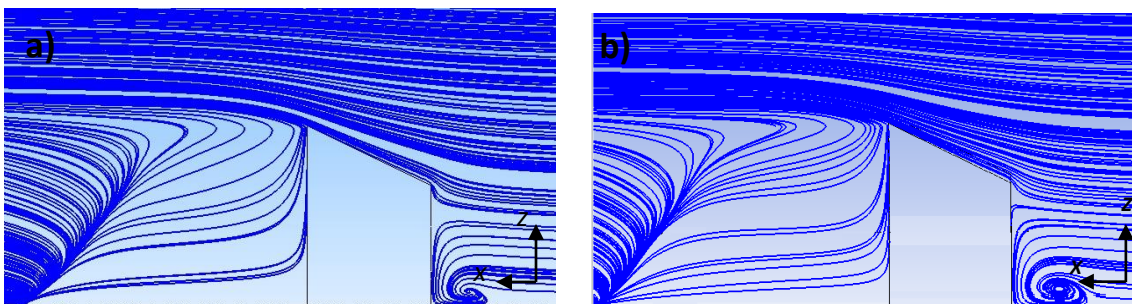


Figura 13 Linhas de corrente do escoamento nas proximidades do obstáculo com telhado uma água ($\theta = 0^\circ$): (a) $Re = 1920$ (b) $Re = 3931$.

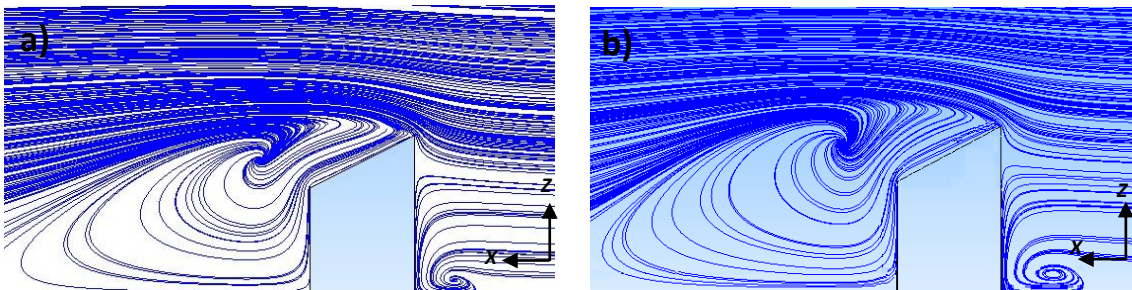


Figura 14 Linhas de corrente do escoamento nas proximidades do obstáculo com telhado uma água ($\theta = 180^\circ$): (a) $Re = 1920$ (b) $Re = 3931$.

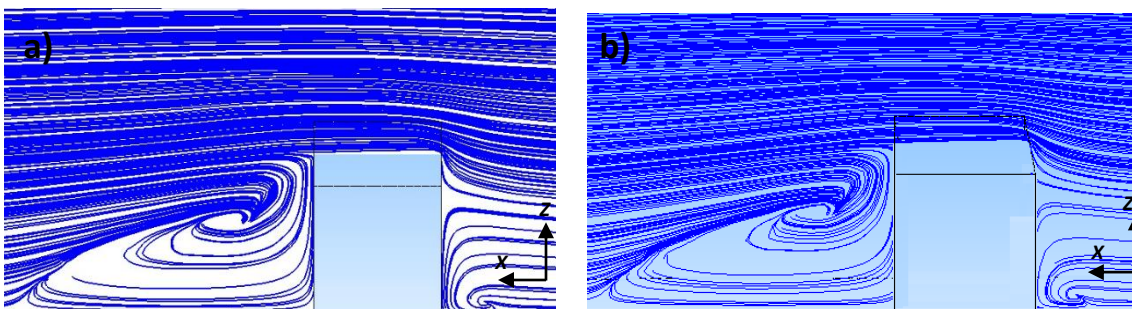


Figura 15 Linhas de corrente do escoamento nas proximidades do obstáculo com telhado duas águas ($\theta = 0^\circ$): (a) $Re = 1920$ (b) $Re = 3931$.

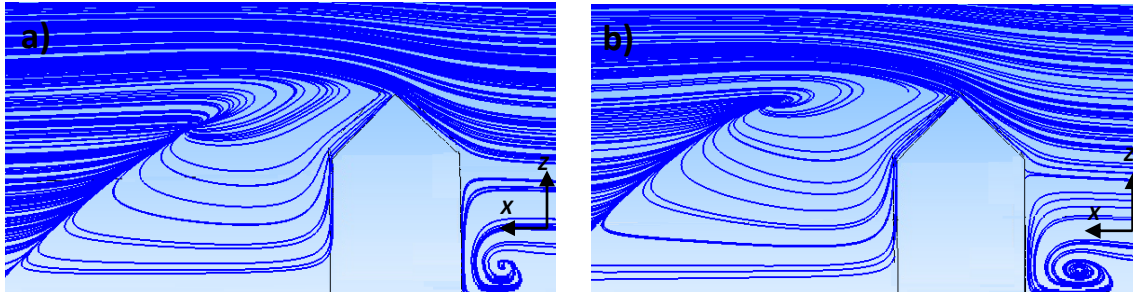


Figura 16 Linhas de corrente do escoamento nas proximidades do obstáculo com telhado duas águas ($\theta = 90^\circ$): (a) $Re = 1920$ (b) $Re = 3931$.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações físicas e numéricas para investigar os efeitos que diferentes estruturas de telhados causam no escoamento nas proximidades de um obstáculo isolado. Os resultados dos campos instantâneo e médio mostraram uma significativa influência da geometria do telhado e do ângulo de ataque do vento incidente na estrutura do escoamento. Nos estudos experimentais do campo instantâneo, vento incidente $\theta = 0^\circ$, para o obstáculo uma água e duas águas foram observadas uma separação do escoamento e formação de uma zona de recirculação no telhado. Estes resultados sugerem que a camada limite cisalhante e a separação do escoamento geram uma turbulência de pequena escala no nível do telhado. Com $\theta = 180^\circ$ para o obstáculo uma água, e $\theta = 90^\circ$ para o obstáculo duas águas, ocorreu a formação de vórtices *shedding* no telhado. As análises do campo médio com o modelo κ - ϵ padrão conseguiram capturar algumas das estruturas observadas nas simulações de túnel de vento, tais como os vórtices frontais e recirculações na região de esteira. Entretanto, o modelo não apresentou boa performance nas predições das recirculações no telhado e formação dos vórtices *shedding*.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dijk, A., Lange, H.C., Compressible laminar flow around a wall-mounted cubic obstacle, *Computers & Fluids*, **Vol.** - 36, pp. 949-960, 2007.
- [2] Cezana, F.C., Simulação Numérica da Dispersão de Poluentes ao Redor de um Obstáculo Isolado sob Diferentes Condições de Estabilidade. Tese de Mestrado de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- [3] Nozu T, Tamura T, Okuda Y, Sanada S. LES of the flow and building wallpressures in the center of Tokyo. *Journal Wind England Aerodynamic*, **Vol** – 96, pp. 1762–73, 2008.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

- [4] van Hooff, T., Blocken, B., Aanen, L., Bronsema, B., A venture-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. *Building Environment*, **Vol.**- 46(9), pp. 1797-1807, 2011.
- [5] Ai, Z.T., Mak, C.M., CFD simulation of flow and dispersion around an isolated building: Effect of inhomogeneous ABL and near-wall treatment, *Atmospheric Environment*, **Vol.** 77, pp.568-578, 2013.
- [6] Santos, J. M., Flow and dispersion around isolated buildings. Ph.D. Thesis. Department of Chemical Engineering University of Manchester, England, 2000.
- [7] [Becker, S., Lienhart, H., Durst, F., Flowaround three-dimensional obstacles in boundary layers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **Vol.** – 90, pp. 265–279, 2002.
- [8] Zhang, Y.Q., Arya, S.P., Snyder, W.H. A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building. *Atmospheric Environment*, **Vol.** - 30, pp. 1327–1345, 1996.
- [9] Zucoloto, S. C.; Queiroz, J. C.; Paula, R. R. C.; Cezana, F. C.; Goulart, E. V.; Gomes, M. S. P. Visualization studies of the vortex system around 3-D rectangular buildings. *Revista Ciência e Natura*. **Volume Especial VIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia**, pp. 476 - 480, 2013
- [10] RAFAILIDIS, S. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary-Layer Meteorology*, **Vol**- 85, pp.255-271, 1997.
- [11] Ledo, L., Kosasih, P.B. e Cooper, P., Roof mounting site analysis for micro-wind turbines, *Renewable Energy*, **Vol.** -36(50), pp. 1379-1391, 2011.
- [12] Souza, B.H., Cezana, F.C., Paula, R.R.C., Brito, M.P., Gomes, M.S.P., The Interference of Roof Profile on Wind Fields of Industrial Buildings, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, COBEM2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.
- [13] Junior, A.C.P. Elementos Finitos Aplicados à Turbulência, *Turbulência, Turbulência: Anais da I Escola de Primavera em Transição e Turbulência*, Rio de Janeiro, 1995.